

第一章 光學理論分析

光學系統是由透鏡組合而成，本章主要敘述光的基本原理，透鏡的幾何光學成像理論，以及像差的問題，當中並以光學廠實際生產的鏡頭為例子，輔以印證理論。

1-1 基本原理

光是自然界的產物，以下就光的特性以及物理量加以說明。

1-1.1 可見光

可見光是電磁波譜之一部份，人的眼睛可視為是電磁波接收器，工作於此波段並依此定義出可見光。

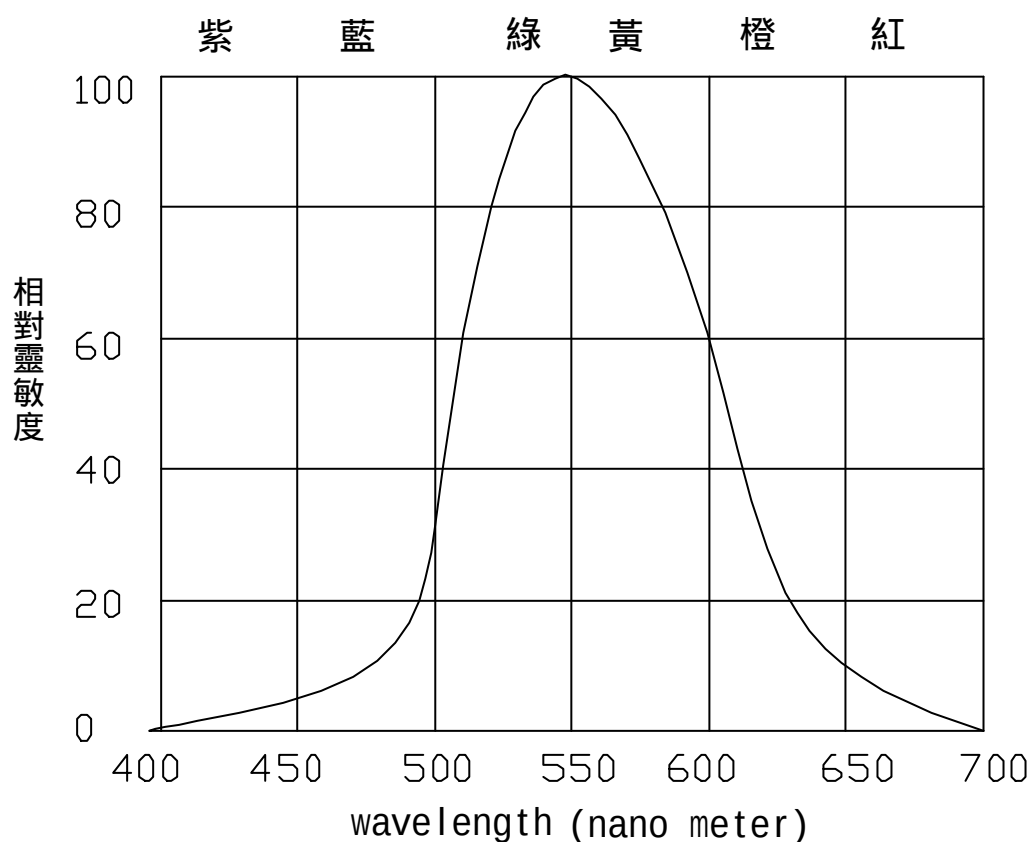


圖 1-1 在溫和的照明下，眼睛對不同波長之光的相對視力靈敏度。

在光學中常用奈米(nanometer; $1\text{nm}=1\times 10^{-9}\text{m}$)為波長單位,圖 1-1 顯示可見光中心區域波長約為 550nm,顏色為黃綠色。視力靈敏曲線在長波長及短波長處漸趨近於軸。一般定視力靈敏度降至其最大值的 1%處為極限,兩極限的波長值分別約為 430nm 和 690nm。在此限度外之輻射若強度夠的話,眼睛仍能探測到;若強度弱時,在許多物理實驗中可用照相底片或感光靈敏之電子探測器代替人眼。

因光同時具有波和粒子的特性,一般物理現象的解釋則採用適性策略:對於光的行進以電磁波解釋,對於光的吸收與輻射,則以粒子特性來處理。

一般基礎光學依光的性質和實驗結果分為三類:

- 1.幾何光學:將光視為粒子處理,但考慮的是整體特性表現,亦即對光的描述是用光線(ray)的集合-光束(light beam),以及物點、像點等概念。
- 2.量子光學:將光視為粒子處理,但探討的是各別粒子本質。
- 3.波動光學:將光視為電磁波處理,本領域又稱物理光學。

本論文研究的對象是精密光學元件,因此以幾何光學為應用基礎。

1-1.1 光源和光速

物體本身能發光的,如太陽 火焰 電燈 雷射稱為光源(luminous source)。藉由光源照射物體而反射光線,方能使我們感覺物體的存

在。光線可看做是由許多光子 (photon) 所組成，至於光束則是由許多光線匯集而成的光束線。

光在真空中，具有最大的速度，用符號 c 代表光在真空中的速度，是自然界的常數： $c=299,792.5\text{km/s}$ 30 萬公里/秒。

1-1.2 光度與照度

光源的發光強度稱為光度 (luminous intensity)。以鯨油脂製成的蠟燭，每小時燃燒 120 格冷 (1grain 0.0648 克)，所發出的光度，定為一國際燭光。

光源每單位時間所輻射出來的能量，為此光源之輻射通量，只有某小部份 (波長從 400nm 到 700nm) 的輻射通量能使人眼感覺其存在，此部份的輻射通量稱之為光通量 (luminous flux)，單位為流明 (lumen)。一標準燭光的光源，在一立體弧度角內所通過的光通量，稱為一流明。

物體被照射時，在與光線垂直的表面上，單位面積所受到的光通量稱為照度 (illuminance)，單位為流明 / 公尺²。

1-1.3 光的直線傳播

在均勻的介質中，光前進的方式是以直線的方式而行，早期的針孔像機 (pinhole camera) 利用針孔成像的原理裝成，足以證明光是直線前進的，觀察像面上所成的像，是上下顛倒並且左右相反，像高與

針孔至像面距離成正比關係，沒有像差問題，且有相當程度的景深效果，如此看來針孔像機近似完美的光學系統，但是針孔非常地小，亮度卻是一大問題，且解析度將受限於繞射極限。

1-1.4 折射率

光學中折射率是一個非常重要的量，用符號 n 表示。介質折射率的大小定義成光在真空中的速度與光在介質速度中的比值

$$n = \frac{c}{v}, \quad (1-1.1)$$

式中 n 表示折射率， c 表真空中之光速， v 表光在介質中之速度。

光在水中的速度是光速的四分之三，所以水的折射率約為 1.3，而一般光學玻璃的折射率約為 1.5，至於空氣 $n \approx 1$ 。折射率還有一個特性，介質中的折射率會隨著光波波長而改變，這種關係也就是引起色散（dispersion）現象的原因。

1-1.5 光程

光程（optical path 簡稱 op）也是光學中一個非常重要的量，對一個均勻介質而言，它的定義是介質折射率 n 與實際光線所行走路徑 s 的乘積

$$op = ns \quad (1-1.2)$$

若光所經過的是由 m 種不同折射率所構成的均勻介質層，那麼光從 1 到 m 層介質的光程計算就應該是各層介質的折射率與實際路

徑乘績的總和為

$$op = \sum_{i=1}^m n_i s_i \quad (1-1.3)$$

如果光是在非均勻性的介質中行走，介質折射率就是一個位置的函數，光程計算相當於由起點(a)到終點(b)經過了多個不同折射率的介質層

$$op = \int_a^b n(s) ds \quad (1-1.4)$$

1-1.6 色散

由於折射率是波長的函數 $n(\lambda)$ ，所以當一束複色光經折射後，因各單色光的折射率各不相同，造成折射方向有所差異，這種現象稱為色散。色散能力 φ 表示式如下

$$\varphi = \frac{n_F - n_C}{n_D - 1}, \quad (1-1.5)$$

式中 n_F 表藍光 ($\lambda = 486.13\text{nm}$) 在介質 n 的折射率， n_C 表紅光 ($\lambda = 656.27\text{nm}$) 在介質 n 的折射率，以及 n_D 表黃光 ($\lambda = 589.29\text{nm}$) 在介質 n 的折射率。

然而對於一般玻璃而言， φ 值約在 0.012~0.05 之間，數值較小使用上不方便，反而其倒數較常用來衡量介質的色散能力，一般稱 φ 值倒數為 Abbe 數 (Abbe number) V_d

$$V_d \equiv \frac{1}{\varphi} = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C} \quad (1-1.6)$$

V_d 值約介於 20~80 之間，此值越小表示色散愈大。

1-1.7 光學玻璃

用於製造成透鏡等光學元件的玻璃，特別講究純度和均勻度等性質，所以稱為光學玻璃。描述光學玻璃有兩個重要的參數為折射率 N_d 與 Abbe 數 V_D 。有了 N_D 值及 V_D 值，那麼光學玻璃的光學特性就幾乎完全掌握了。光學玻璃之材質務必兼顧到光學性質，物理性質，及化學性質。現分別敘述如下：

性能分為 a. 光學性質：折射率、色散率、著色度。b. 物理性質：比重。c. 機械性質：硬度(耗損率)、衝擊、彎曲率。d. 熱性質：轉移點、軟化點、線膨脹係數。e. 電氣性質：使用波長。f. 化學性質：耐水性、耐酸鹼性、耐風化性。

特性有 a. 耐水性、耐酸鹼性良好，即化學性質穩定。b. 一般而言，折射率高者，耐酸性差，耐水性好，普遍來說材質含鉛，所以比重較重。相反地，折射率低者，耐酸性好而耐水性差，比重較輕。c. 研磨之難易度視光學玻璃被水侵蝕之快慢而定，耐水性差最易研磨，而耐水性良好即難研磨。d. 耐化學性差之光學玻璃，較易研磨，但研磨面較易產生雲霧霉狀，或腐蝕。

品質定義為 a. 依折射率與色散率而分，其種類共有兩百多種。b. 光學上之均勻性。c. 光學公差，折射率 N_d ： $\pm 0.00001 \sim 0.0001$ ，色散率 V_d ： $\pm 0.2 \sim 0.05\%$ 。d. 脈紋、氣泡與偏心。